土壤学理论和技术创新促进区域农业持续发展和地方经济建设*



丁维新　周凌云　朱安宁　马东豪　信秀丽

中国科学院南京土壤研究所 封丘农业生态实验站 南京 210008

摘要　黄淮海地区是我国第二大平原，在国家粮食安全和国民经济发展中有不可替代的战略地位。黄淮海平原主要由黄河、淮河、海河等多沙性河流冲积而成，历史上长期面临旱、涝、盐碱、风沙等农业生产问题。在此背景下，以中科院南京土壤所熊毅院士为首的研究队伍，于1963年进驻黄淮海平原，创建了“井灌井排”治理盐碱的核心技术。20世纪80年代初，以中科院南京土壤所为主的研究队伍再次会聚封丘，开展治理旱涝灾害和改良低产土壤工作，并由此建立了中科院封丘农业生态实验站（简称“封丘站”）。自建站以来，尤其是近10年来，在国家科技部、国家自然科学基金委、农业部和中科院等大力支持下，以封丘站为野外基地，国内科研人员联合开展了系统研究和技术研发，取得了一系列研究成果。在基础理论研究方面，揭示了潮土障碍形成机制和土壤质量演变规律，解析了土壤有机质的周转规律和土壤结构的形成机制，提出了土壤地力定向培育的对策；在技术研发和应用方面，创建了土壤地力培育和大面积均衡增产栽培技术，并在河南省20多个粮食生产重点县示范推广。通过与地方政府和企业合作，研发了道地金银花和树莓规范化、标准化高效栽培技术，建立了“企业+科研+基地+农户”的发展模式，为国家粮食安全保障体系建设和地方经济发展做出了重要的贡献。

关键词　土壤学理论技术创新，黄淮海平原，土壤地力，中低产田改良技术，作物高效栽培技术

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2017.12.015

*资助项目：中科院战略性先导科技专项（XDB15020100），国家自然科学基金重点项目（41730753）

修改稿收到日期：2017年11月27日

黄淮海平原是我国三大平原之一，跨越北京、天津、河北、山东、河南、安徽、江苏7省市，总面积达到300 000 km^2，耕地面积占全国耕地总面积的1/6，是我国最重要的粮、棉、油、肉、果生产基地，在国家粮食安全和国民经济发展中有不可替代的战略地位。黄淮海平原主要由黄河、淮河、海河等多沙性河流冲积而成，历史上曾长期面临旱、

涝、盐碱、风沙等系列阻碍区域农业发展的问题。1963 年开始，以中科院南京土壤所熊毅院士为首的大批科研人员进驻黄淮海平原，创建了以“井灌井排”为核心的控水控盐碱增产技术，并于 1965 年取得大面积示范成功。从“六五”计划开始，国家将黄淮海平原区域治理列入国家科技攻关计划。在此背景下，中科院南京土壤所于 1983 年 5 月在河南省封丘县潘店乡建立了封丘农业生态实验站（简称“封丘站”），围绕农业生产与农村经济发展，开展了长期卓有成效的科学研究和生产实践，逐步形成了治理旱涝灾害和改良低产土壤的技术体系，使得旱、涝、盐碱等危害因素得到有效控制。20 世纪 80 年代，封丘县潘店乡万亩试区的粮食单产由每亩 194 kg 增加到 508 kg[1,2]。

尽管黄淮海平原农业综合整治方面取得了巨大成就，但是中低产农田比例仍然占到 2/3，依然存在着限制作物产量进一步提升的诸多因素。主要问题有 4 个方面：*（1）土壤有机质含量偏低。*黄淮海平原每公斤土壤中有机碳含量只有 6.40 g，低于全国旱地土壤平均水平 9.60 g[3]，仅为美国农田土壤的 1/3。*（2）土壤养分供应失衡。*随着高产作物品种运用和农业集约化程度提高，重用化肥尤其是氮肥，轻视有机肥投入，导致土壤主要养分供应比例失调。*（3）水分、养分利用效率低。*由于土壤有机质含量低，土壤结构性差，保蓄水分养分能力尤其是无机氮有机化的能力弱，小麦和玉米的氮肥利用率平均只有 24%（11%—45%）[4]。这不仅远低于西方发达国家的利用率（>50%），也低于全国氮肥的当季利用率（30%—35%）[5]。农民不得不增大氮肥用量以满足作物需求，导致大量无机氮在土体累积并向水体输出，增大了环境负荷。*（4）盐渍化潜在威胁依然存在。*经过多年治理，黄淮海平原盐渍化土壤的比例已经很小，但是由于盐分主要被淋洗到土壤的下层，一旦发生不合理的灌溉，极易诱发次生盐渍化。而滨海地区盐渍化土壤的面积依然很大，治理难度更高，挑战性更强。针对上述问题，封丘站面向国家重大需求，系统地开展了理论和技术创新，助力区域农业持续发展和地方经济建设。

1 构建长期定位试验体系，为理论创新和技术研发提供保障

土壤发育和肥力形成是一个漫长的过程，因此土壤学研究高度依赖长期定位试验样地。国际上最早的长期定位试验于 1843 年在英国洛桑试验站建立，迄今已有 170 多年的历史，不仅理论贡献突出（例如基于长期试验及其保存的土壤样品，Jenkinson 和 Rayner[6]建立了世界上第一个土壤碳循环模型），同时还为当地农民提供示范，起到了直接的指导作用，有效推动了英国农业和生态的发展。

封丘站建站伊始就高度重视长期定位试验的建设，围绕建站的两个定位（一是中科院部署在黄淮海平原，特别是沿黄河及黄河泛滥地区，从事农业、资源、生态和环境研究的最主要野外试验基地；二是中国生态系统研究网络（CERN）布点在黄淮海平原，特别针对沿黄河及黄河泛滥地区生态环境演变进行长期监测的重点网站），开始有序规划，分阶段实施（图1）。目前已经拥有大型水盐动态地下模拟实验室、群体称重式蒸渗仪系统、雨养农田生产潜力、有机无机肥长期施用效应、水分养分协同增效、耕作模式等定位试验（图2），为封丘站研究成果产出和可持续发展奠定了坚实的基础。

2 揭示了区域土壤质量演替规律，创新和发展了土壤学基础理论

2.1 评估了区域水资源特征，研发了农田墒情无线监测网络系统，提出了农田灌溉策略

创建了拥有自主知识产权的中小流域分布式水循环模拟模型（INHAW）[7]，以天然文岩渠小流域（2 514 km^2）为案例区域，评估了区域水资源特征。该小流域多年平均水资源量为 23.5×10^8 m^3，其中年均降雨总量 14.08×10^8 m^3（相当于降水量 559 mm，后同），引黄灌溉水量 6.27×10^8 m^3（249 mm），黄河侧渗水量 6.93×10^8 m^3

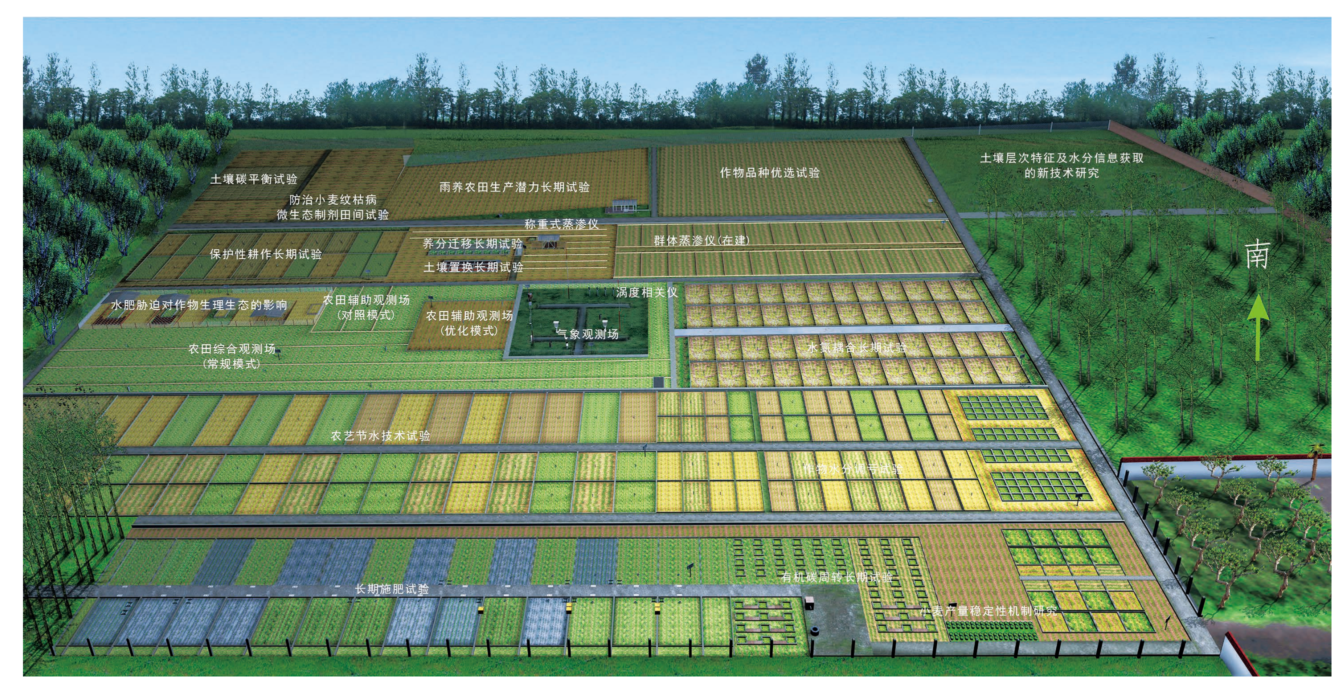


图 1　封丘站田间定位试验空间分布格局



图 2　封丘站大型科研设施和长期定位试验样地

(a) 大型水盐动态地下模拟实验室（1985 年）；(b) 群体称重式蒸渗仪系统（2011 年）；(c) 有机无机肥长期施用效应试验（1989 年）；(d) 免耕和常规耕作长期效应试验（2006 年）

（275 mm），大车集出口断面平均径流量 3.78×10^8 m^3（149 mm），流域可用水资源为 934 mm，因此沿黄灌区具有创高产的水分持续生产力。但是，潮土区降水少，季节分配不均，农业水资源利用效率低。基于封丘站大型蒸渗仪，对作物耗水过程进行了长期观测，明确了小麦-玉米轮作系统的耗水规律。发现要实现年亩产 1 t 以上，年度需水 830 mm，其中玉米季需水 358 mm，当前降水量基本能够满足需求；而小麦季需水 473 mm，尚须通过灌溉补充亏缺的 311 mm。

土壤水力特性是土壤水文过程模型的重要输入参数。由于土壤水力特性的空间变异大，如何在野外获得准确的土壤水力特性分布是制约土壤水文过程模拟的关键因素之一。为此发展了水平入渗方法快速测定扰动土壤水力特性模型参数的方法[8-10]，建立了通过垂直入渗试验测定土壤水力特性参数的新理论[11,12]，实现了田间原位快速测定不同尺度土壤水力特性参数，为相关研究提供了新技术和新手段。

研制了新型土壤水分传感器和农田墒情无线监测网络系统（图 3）[13]，实现了农田土壤水分、降水、水面蒸发量、地下水位等信息的时空动态自动监测以及农田墒情的预测和预报。建立了区域尺度水氮管理模型[14]，提出了区域尺度的农田灌溉策略[15]，实现了区域尺度农业水资源的优化利用。

2.2 揭示了潮土质量演变规律和基础地力本质，为土壤地力定向培育提供理论基础

基于有机无机肥长期定位试验，发现化肥长期施

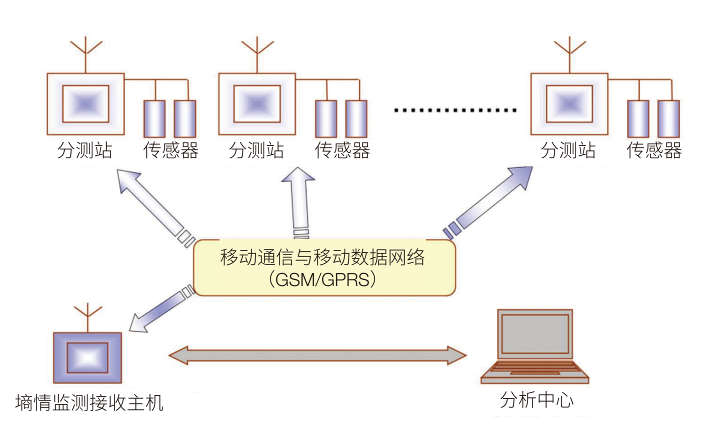


图 3 农田墒情无线监测网络系统

用，只要平衡不过量，作物可以持续高产，土壤肥力也不断提升，从而修正了国际上“长期施用化肥不可持续”这一一概而论的观点[16]。利用田间原位测定技术，明确了我国旱地土壤有机质的稳定性和周转速率，以及潮土有机质快速分解的内在机制和两面性效应：高效提供养分和阻抑有机质累积[17-19]。提出了潮土团聚体形成机制和关键控制因素，主要受控于微团聚体和粉黏粒组分中有机碳含量，随着粉黏粒组分中有机碳增加，该粉黏粒组分不断地团聚形成微团聚体或者大团聚体，微团聚体则通过自身或者与粉黏粒组分结合形成大团聚体[20]。团聚化程度越高的土壤，小于 4 μm 孔径孔隙的比例越高，导致土壤氧气有效扩散系数降低，阻抑好氧菌生长，促进兼性和厌氧菌繁殖，降低了好氧菌/厌氧菌比值，使芽孢杆菌（*Bacillus asahii*）成为优势微生物[21]，减缓了有机碳的分解速率，这证明潮土有机质、团聚体和微生物群落之间存在着联动关系[22]。采用碳-13 示踪技术研究发现，外源碳在有机质含量高的土壤中残留率高于有机质含量低的土壤，这表明肥力水平低的土壤，有机质提升的难度相对更大，其潜在机制是该类土壤的微生物以好氧菌为主，高效分解外源碳[23]，由此提出了潮土有机质有效提升的对策[24]。

提升有机质含量是潮土地力定向培育的关键。有机无机肥长期试验表明，单施有机肥可以高效增加土壤碳，但会影响作物产量；而无机有机氮肥对半配施则可以实现产量和土壤碳的双提升。一般认为免耕可以增加土壤碳含量，但是在黄淮海平原，免耕后会发生土壤碳的表聚，削减土壤碳的增加效应，封丘站由此提出了“五季连免、一季深翻”的少免耕技术。采用碳-13 自然丰度技术，发现秸秆制成的生物质炭具有负激发效应，能够减缓潮土活性有机碳的分解，实现土壤有机碳快速提升和农业废弃有机资源高效循环利用[25]，而生物质炭生产成本降低将是大面积推广应用需要突破的关键。

3 创建了农田地力提升与作物高效栽培的技术体系，为区域农业发展提供科技支撑

3.1 土壤地力培育和大面积均衡增产栽培技术及其应用

在中科院-河南省合作项目“耕地保育与持续高效现代农业试点工程——封丘试区”“高产高效现代农业示范工程”“现代农业示范与区域创新集成计划”等的大力支持下，张佳宝研究员组织中科院和河南省相关科研单位的科研人员开展联合攻关，创建了“黄淮地区农田地力提升与大面积均衡增产技术”（图 4），并以封丘县为核心示范县，其他 1 市 22 县为扩展示范县，展开大面积推广应用。2011—2013 年累计示范推广面积 1 459 万亩，新增粮食 8.75×10^8 kg，增收节支 40.2 亿元，全面提升了区域粮食生产潜力和农业生产水平，研究成果获得国家科技进步奖二等奖。

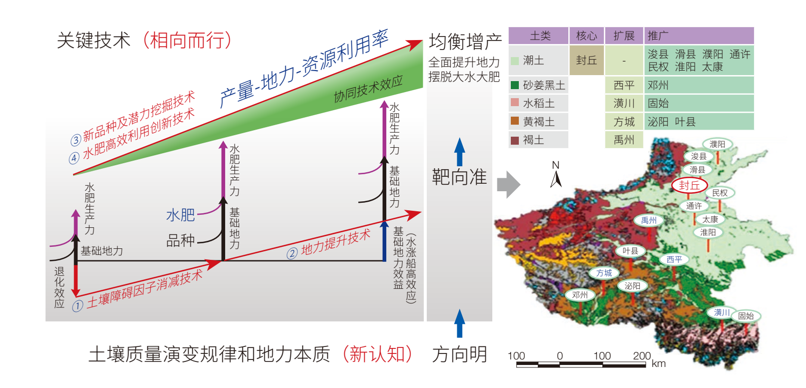


图 4 农田地力提升与大面积均衡增产技术体系

3.2 道地金银花规范化种植技术研发、示范与产业发展

随着河南农业结构调整的深入，封丘站围绕“确保粮食安全、提高农业增长质量和效益、增加农民收入”目标，以封丘县具有资源比较优势的特色经济作物——金银

花为抓手，与地方政府通力合作，以高效种植模式为突破口，形成了具有区域特色的农业主导产品和支柱产业。通过对金银花物种和种内种质比较，筛选出了优良种质。系统研究了金银花的生物学特性和生长规律，甄别了影响产量和质量的关键因素，制订了金银花规范化种植的标准操作规程和金银花药材的质量评价标准。创建了金银花高产优质种植技术体系，建立了金银花规范种植技术示范基地。利用封丘县广播电视网，举办金银花规范化生产技术培训系列讲座，累计培训药农5万多人次，印发培训资料 10 多万册，并刻录了光盘赠送药农。建立了“企业+科研+基地+农户”的发展模式，封丘县已经成为哈药集团、金陵药业、佐今明药业等的金银花药源基地，种植面积达到 10 万多亩，年产值 11 亿元，为我国金银花等中药材规范化生产提供了借鉴样板（图 5）。

3.3 树莓产业化技术研发与示范

围绕封丘县树莓产业化，与地方政府合作，研发了种植-加工一体化的封丘县主导产业体系。通过对黑莓 16 个优良品种的引种，筛选出 5 个优质品种繁育推广，制定了树莓标准化种植技术规程和有机种植技术标准，累计培训农民 1.5 万人次，技术推广服务 4 万多亩（图 6）。“封丘树莓”已经取得“有机产品认证证书”和“国家地理标志保护产品”，封丘县也获得了“国家级树莓种植综合标准化示范区”“农业科技试验示范基地”“中国树莓之乡”等称号。与河南美日康农业发展有限公司合作，建立了树莓种植+加工基地，形成了树莓浓缩果汁、饮料、果酒、干果、果酱、干酒、果茶、精油等系列产品，解决了树莓种植农户的后顾之忧。目前封丘全县树莓种植面积 4 万多亩，5 年后将发展到 15 万亩。每亩树莓鲜果产值 1 万余元，纯收益 7 000 多元。河南美日康农业发展有限公司年产值 19 亿元，利税 3 亿元。

4 结语

封丘站自 1983 年建站以来，围绕黄淮海平原农业生产和生态环境中的核心问题，开展了长期而卓有成效





图 5　金银花高效栽培





图 6　树莓种植技术研发和示范基地

的监测、研究、技术研发和示范推广，为国家粮食安全保障体系和生态环境建设作出了重要贡献。通过承担国家和省部级重大项目，揭示了土壤的质量特征和演变规律，发展了土壤学基础理论，引领了我国土壤地力领域的研究，在国际上产生了广泛的影响。通过与地方政府合作，创建的土壤地力提升和作物均衡增产栽培技术体系实现大面积应用和示范推广，从而全面提升了粮食生产潜力，提高了区域农业生产水平，增加了农民收入。通过与企业合作，构建了"企业+科研+基地+农户"的发展模式，提升了企业利润空间，提高了农户收益。目前封丘站正在重点推进研究型野外基地科研设施建设，培养和引进优秀人才，进一步提升学术研究水平和技术研发能力，以期更好地发挥知识和技术创新平台与技术集成和转移平台的作用，为区域农业可持续发展和地方经济建设做出更大的贡献。

参考文献

1 傅积平. 黄淮海平原区域治理技术体系研究. 北京: 科学出版社, 1987.

2 傅积平, 王尊亲. 豫北平原旱涝盐碱综合治理. 北京: 科学出版社, 1992.

3 Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. Global Change Biology, 2007, 13: 1989-2007.

4 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.

5 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1988.

6 Jenkinson D S, Rayner J H. Turnover of soil organic matter in some of Rothamsted classical experiment. Soil Science, 1977, 123: 298-305.

7 Liu J, Chen X, Zhang J, et al. Coupling the Xinanjiang model to a kinematic flow model based on digital drainage networks for flood forecasting. Hydrological Processes, 2009, 23: 1337-1348.

8 Ma D H, Wang Q J, Shao M A. Analytical method for estimating soil hydraulic parameters from horizontal absorption. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73: 727-736.

9 Ma D H, Shao M A, Zhang J B, et al. Validation of an analytical method for determining soil hydraulic properties of stony soils using experimental data. Geoderma, 2010, 159: 262-269.

10 Ma D H, Zhang J B, Lai J B, et al. An improved method for determining Brooks-Corey model parameters from horizontal absorption. Geoderma, 2016, 263: 122-131.

11 Ma D H, Zhang J B, Lu Y X, et al. Derivation of the relationships between Green-Ampt model parameters and soil hydraulic properties. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79: 1030-1042.

12 Ma D H, Zhang J B, Horton R, et al. Analytical method to determine soil hydraulic properties from vertical infiltration experiments. Soil Science Society of America Journal, 2017, DOI: 10.2136/sssaj2017.02.0061.

13 Xin X L, Xu F A, Zhang J B, et al. A new resistance sensor for monitoring soil matric potential. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71: 866-871.

14 Li Y, White R, Chen D L, et al. A spatially referenced water and nitrogen management model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain. Ecological Modelling, 2007, 203: 395-423.

15 Li X, Zhang J, Liu J, et al. A modified checkbook irrigation method based on GIS-coupled model for regional irrigation scheduling. Irrigation Science, 2011, 29: 115-126.

16 张佳宝, 林先贵, 李晖. 新一代中低产田治理技术及其在大面积均衡增产中的潜力. 中国科学院院刊, 2011, 26(4): 375-382.

17 Ding W X, Meng L, Yin Y, et al. CO_2 emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 669-679.

18 Ni K, Ding W X, Cai Z C, et al. Soil carbon dioxide emission

from intensively cultivated black soil in Northeast China: nitrogen fertilization effect. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12: 1007-1018.

19 Chen Z M, Xu Y H, Zhou X H, et al. Extreme rainfall and snowfall alter responses of soil respiration to nitrogen fertilization: a 3-year field experiment. Global Change Biology, 2017, 23: 3403-3417.

20 Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of compost and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. Soil Tillage and Research, 2012, 124: 170-177.

21 Feng Y Z, Chen R R, Xu J L, et al. Bacillus asahii comes to the fore in organic manure fertilized alkaline soils. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 186-194.

22 Zhang H J, Ding W X, Yu H Y, et al. Linking organic carbon accumulation to microbial community dynamics in a sandy loam soil: result of 20 years compost and inorganic fertilizers repeated application experiment. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51: 137-150.

23 Zhang H J, Ding W X, Yu H Y, et al. Carbon uptake by a microbial community during 30-day treatment with ^{13}C-glucose of a sandy loam soil fertilized for 20 years with NPK or compost as determined by a GC-C-IRMS analysis of phospholipid fatty acids. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 228-236.

24 Yu H Y, Ding W X, Chen Z M, et al. Accumulation of organic C components in soil and aggregates. Scientific Report, 2015, 5: 13804.

25 Lu W W, Ding W X, Zhang J H, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 76: 12-21.

Theory and Technique Innovation in Soil Science Promoted Sustainable Development of Agriculture and Local Economy in Huanghuaihai Plain

Ding Weixin　Zhou Lingyun　Zhu Anning　Ma Donghao　Xin Xiuli

(Fengqiu Agro-Ecological Experimental Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract　The Huanghuaihai Plain is one of the three greatest plains in China, and occupies an irreplaceable strategic position in the national food security and national economic development. Huanghuaihai Plain is mainly alluvial by the Yellow River, Huaihe River, and Haihe River, and was confronted with the problems of drought, flood, salinity, sand drift, and other obstacles in agricultural production. In order to solve above problems, the research team led by academician Xiong Yi in the Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences (CAS), set up the research base in Fengqiu County, Henan Province in 1963, and created a core technology for minimizing salinity in saline soil, which was known as “well irrigation and well drainage”. In the early 1980s, the new research team, which primarily consisted of the scientists in the Institute of Soil Science, CAS, again gathered in Fengqiu County, Henan Province, to carry out the treatment of drought and flood barriers and to improve soil fertility. During that time, the Fengqiu Agro-Ecological Experimental Station was established by the Institute of Soil Sciences, CAS. Since then, especially in the past decade, scientists have made series of research progresses in soil science and crop production under the financial support by the Ministry of Science and Technology, National Natural Science Foundation of China, Ministry of Agriculture, and CAS. The formation mechanism of soil obstacles and evolution process of soil quality were revealed. The turnover and accumulation characteristics of soil organic matter and formation of soil structure were evaluated. The countermeasures for improving medium- and low-yield farmlands were put forward. Meanwhile, a new generation of controlling techniques for increasing soil fertility and improving medium- and low-yield fields were developed, aiming at the settlement of thorny problems. These techniques were demonstrated and extended in 0.97 million ha of

medium- and low-yield fields, with the tremendous benefits in grain production increase. In cooperation with local governments and enterprises, the standardization cultivation techniques of authentic honeysuckle and raspberry or blackberry were developed, and the combination mode of "enterprises plus scientists plus research base plus farmers" was created, which drastically increased profits of both enterprises and farmers. In summary, scientists in the Fengqiu Agro-Ecological Experimental Station, CAS, has made great contribution to the construction of national food security system and local economic development in the past three decades.

Keywords theory and technique innovation in soil science, huanghuaihai plain, soil fertility, improvement of medium- and low-yield field, high-yield crop production technique

丁维新 中科院南京土壤所研究员，封丘农业生态实验站站长。国家自然科学基金委杰出青年基金获得者，中科院“百人计划”入选者和引进国外杰出人才，全国百篇优秀博士学位论文奖和中科院优秀博士学位论文奖获得者，国家自然科学奖二等奖和国家科技进步奖二等奖获得者。主要研究领域包括土壤有机碳转化和累积机制，土壤含氮气体产生和保氮机理，湿地生态系统甲烷产生、氧化和排放机制，畜禽粪污肥料化和农田消纳技术等。参编专著3部，发表*SCI*论文81篇。E-mail: wxding@issas.ac.cn

Ding Weixin Professor in the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (CAS), and head of Fengqiu Agro-Ecological Experimental Station. He is a winner of National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars from National Natural Science Foundation of China in 2007, and "Hundred Talents Project" of the Chinese Academy of Sciences in 2006. He is also the recipient of second-class prize of National Natural Science Award in 2008 and National Science and Technology Progress Award in 2014. His Ph.D. dissertation was awarded with "National Top-hundred Best Dissertation in China" in 2005 and Best Dissertation in Chinese Academy of Sciences in 2004. His research field includes mechanism of soil organic carbon turn over and accumulation, the microbial processes of nitrogenous gas production, and inorganic nitrogen converted to organic nitrogen in soil, methane production, oxidation, and emission in wetland ecosystem, livestock effluent processing and use in agro-ecosystem, etc. He has published 81 *SCI* papers and co-authored 3 books.
E-mail: wxding@issas.ac.cn